

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-218104

(43)Date of publication of application : 31.07.2003

(51)Int.Cl.

H01L 21/314
 G02B 6/12
 G02B 6/13
 G02F 1/03
 G02F 1/035
 G02F 1/335
 G02F 1/355
 G02F 1/377

(21)Application number : 2002-012509

(71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 22.01.2002

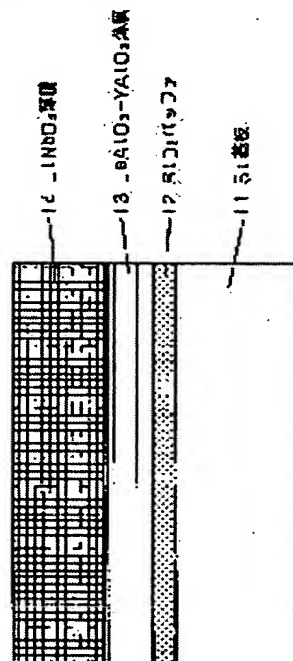
(72)Inventor : FURUYA HIROYUKI
YOKOGAWA TOSHIYA

(54) SEMICONDUCTOR DEVICE AND ITS MANUFACTURING METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To solve such a problem that it is difficult to provide a high-quality thin film due to polycrystallization during crystal growth when LiNbO₃ crystal is formed on an Si substrate and it is very difficult to form it because the LiNbO₃ crystal and lattice constant on a GaAs or InP substrate are further to each other than those on the Si substrate.

SOLUTION: This semiconductor device forms many layers of oxide thin film with changed composition so that they may obtain the lattice constant of an oxide dielectric crystal to be formed finally, and it gradually changes the lattice constant of a semiconductor substrate from the lattice constant of a semiconductor thin film to that of the oxide dielectric crystal to reduce misfit dislocation. Therefore, a high-quality oxide dielectric crystal can be obtained even on the semiconductor substrate.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-218104

(P2003-218104A)

(43) 公開日 平成15年7月31日 (2003.7.31)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
H 0 1 L 21/314		H 0 1 L 21/314	M 2 H 0 4 7
G 0 2 B 6/12		G 0 2 F 1/03	5 0 1 2 H 0 7 9
6/13		1/035	2 K 0 0 2
G 0 2 F 1/03	5 0 1	1/335	5 F 0 5 8
1/035		1/355	5 0 1

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 18 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-12509(P2002-12509)

(22) 出願日 平成14年1月22日 (2002.1.22)

(71) 出願人 000005821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72) 発明者 古屋 博之

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(72) 発明者 横川 俊哉

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器
産業株式会社内

(74) 代理人 100097445

弁理士 岩橋 文雄 (外2名)

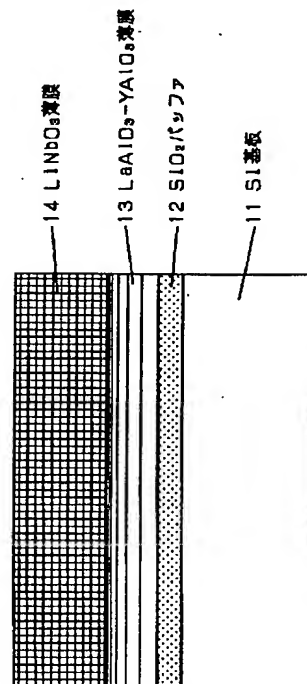
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体装置及びその製造方法

(57) 【要約】

【課題】 Si基板上にLiNbO₃結晶を形成するという報告はいくつか行なわれているが、結晶成長時に多結晶化するため高品質な薄膜を得ることは困難である。また、GaAsやInP基板上ではこれらの結晶のLiNbO₃結晶と格子定数がSi基板以上に離れているため、高品質な薄膜を形成することは、非常に困難である。

【解決手段】 本発明による半導体装置は、最終的に形成する酸化物誘電体結晶の格子定数に近づくように組成を変化させた酸化物薄膜を多層に形成し、この酸化物薄膜の格子定数を半導体基板の格子定数から酸化物誘電体結晶の格子定数まで徐々に変化させることで、従来問題となっていたミスフィット転位を低減させることによって、半導体基板上であっても高品質な酸化物誘電体結晶を得ることが可能となる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 Si基板と、 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層とを順次形成する工程を有し、格子ミスマッチを1%以下にした状態で、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶を形成することを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項2】 GaAs基板と、 BaTiO_3 - SrTiO_3 系酸化物結晶層と、 SrTiO_3 - CaTiO_3 系酸化物結晶層と、 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層を順次形成する工程を有し、格子ミスマッチを1%以下にした状態で、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶を形成することを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項3】 InP基板と、 BaHfO_3 - BaTiO_3 系酸化物結晶層と、 BaTiO_3 - SrTiO_3 系酸化物結晶層と、 SrTiO_3 - CaTiO_3 系酸化物結晶層と、 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層を順次形成する工程を有し、格子ミスマッチを1%以下にした状態で、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶を形成することを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項4】 Si、GaAs、InPなどの半導体基板上に形成されたSi酸化物をバッファ層として、ペロブスカイト系酸化物結晶層を順次形成する工程を有することを特徴とする請求項1から3のいずれかに記載の半導体装置の製造方法。

【請求項5】 Si基板上の半導体装置であり、半導体装置のうち少なくとも一部分において、前記Si基板上に LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層が形成されており、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶が形成された構造を持つことを特徴とする半導体装置。

【請求項6】 GaAs基板上の半導体装置であり、半導体装置のうち少なくとも一部分において、前記GaAs基板上に BaTiO_3 - SrTiO_3 系酸化物結晶層と、 SrTiO_3 - CaTiO_3 系酸化物結晶層と、 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層が順次形成されており、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶が形成された構造を持つことを特徴とする半導体装置。

【請求項7】 InP基板上の半導体装置であり、半導体装置のうち少なくとも一部分において、前記InP基板上に BaHfO_3 - BaTiO_3 系酸化物結晶層と、 BaTiO_3 - SrTiO_3 系酸化物結晶層と、 SrTiO_3 - CaTiO_3 系酸化物結晶層と、 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層が形成されており、前記 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶層上にペロブスカイト系あるいは擬イルメナイト系結晶が形成された構造を持つことを特徴とする半導体装置。

【請求項8】 Si、GaAs、InPなどの半導体基板上に形成されたSi酸化物バッファ層上にペロブスカイト系酸化物結晶層が順次形成された構造を持つことを特徴とする請求項5から7のいずれかに記載の半導体装置。

【請求項9】 請求項1から請求項4のいずれかに記載の方法で形成することを特徴とする、酸化物誘電体結晶による電気光学効果を利用した光変調器および光導波路素子を有する半導体装置の製造方法。

【請求項10】 請求項1から請求項4のいずれかに記載の方法で形成することを特徴とする、酸化物誘電体結晶による弾性表面波素子を有する半導体装置の製造方法。

【請求項11】 請求項1から請求項4のいずれかに記載の方法で形成することを特徴とする、酸化物誘電体結晶による、非線形光学効果を利用した光波長変換素子を有する半導体装置の製造方法。

【請求項12】 請求項5から請求項8のいずれかに記載の構造で形成されていることを特徴とする、酸化物誘電体結晶による電気光学効果を利用した光変調器および光導波路素子を有する半導体装置。

【請求項13】 請求項5から請求項8のいずれかに記載の構造で形成されていることを特徴とする、酸化物誘電体結晶による弾性表面波素子を有する半導体装置。

【請求項14】 請求項5から請求項8のいずれかに記載の構造で形成されていることを特徴とする、酸化物誘電体結晶による、非線形光学効果を利用した光波長変換素子を有する半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体結晶を基板としてその上に格子欠陥の少ない酸化物誘電体結晶を成長させることを特徴とする半導体装置とその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】これまでの光集積回路として、光子と電子素子を集積させる概念は、大まかに分けて2つ存在する。一つ目は、例えばInPなどの化合物半導体基板上に光導波路、受・発光素子などが同一材料で形成され相互接続されることによりあらゆる機能を実現する、OEIC (Opto Electronic Integrate Circuit) と呼ばれるものである。もう一つは、発光素子・受光素子等が導波路を形成した基板上に表面実装技術を用いて実装されているもので、HIC (Hybrid Integrated Circuit) と呼ばれるものである。

【0003】前者は、同一材料で構成されているため、製造が比較的容易ではあるが、導波路として半導体材料を使用しているため、導波路を量子閉じ込めシユタルク効果を利用した吸収型変調器として使用した際、チャープピングと呼ばれる波形の変形が生じることが問題となっている。また、誘電体材料で導波路を形成した場合と比較して高速変調が困難であり導波損失が大きいという欠点を持っていた。

【0004】また、後者は光導波路に最適な材料を使用できるため、例えば光変調器としては高速変調を可能と

なるが、高度な実装技術が必要であり、製造が非常に困難である。

【0005】一方、半導体基板上に酸化物誘電体結晶を形成する方法も検討されているが、半導体基板上に高品質な酸化物誘電体結晶を形成することは困難であり、たとえば酸化物誘電体結晶を導波路として使用する場合には、実用に耐える品質の結晶は得られていない。

【0006】そこで本発明では、上記の問題点を解決するため、半導体基板上に高品質な酸化物誘電体結晶を形成する製造方法を提供することを目的とする。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】半導体基板上に酸化物誘電体結晶を形成することは従来から試みられているが、光素子として使用する品質にまでは至っていない。

【0008】例えば、半導体基板であるSi基板上に酸化物誘電体結晶である LiNbO_3 結晶(ニオブ酸リチウム結晶)を形成するという報告はいくつか行なわれているが、結晶成長時に多結晶化するため高品質な薄膜を得ることは困難である。これは、Si基板と LiNbO_3 結晶間の格子定数の差から生じるミスフィット転位と呼ばれる欠陥が生じるためである。また、実際に光通信等の素子として使用されるGaAsやInP基板上ではこれらの結晶の LiNbO_3 結晶と格子定数がSi基板以上に離れているため、高品質な薄膜を形成することは、非常に困難になる傾向にある。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明による半導体装置は、最終的に形成する酸化物誘電体結晶の格子定数に近づくように組成を変化させた酸化物薄膜を多層に形成し、この酸化物薄膜の格子定数を半導体基板の格子定数から酸化物誘電体結晶の格子定数まで徐々に変化させることで、従来問題となっていたミスフィット転位を低減させることによって、半導体基板上であっても高品質な酸化物誘電体結晶を得ることが可能となる。

【0010】特に本発明において中間層として用いているペロブスカイト系結晶は近年、半導体基板上に絶縁膜として高品質の結晶が形成可能になってきており、この中間層として用いているペロブスカイト系結晶上に異種のペロブスカイト系結晶、あるいはペロブスカイト系結晶と結晶構造が類似している擬イルメナイト系結晶を形成することで、より高品質な酸化物誘電体結晶の形成することを可能としている。

【0011】また、この方法を用いることによってSiは言うまでもなく、従来では非常に困難であった、GaAs基板上やInP基板上であっても高品質な酸化物誘電体結晶を得ることが可能となる。

【0012】

【発明の実施の形態】次に本発明の具体的な実施例を示し、詳しく説明する。もちろんこの発明は以下の例によって制限されるものではない。

【0013】(実施例1)本発明における第1の実施の

形態は、Si基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜において、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示している。

【0014】以下、本発明の第1の実施形態による半導体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致していない。

【0015】図1は本実施形態にかかる半導体装置断面図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に図2(a)~(d)に示している。

【0016】まず、Siよりなる基板11の表面を洗浄する(図2(a))。基板の面方位は(001)方向とした。次にSi基板11を石英管内で加湿した酸素中で950℃に加熱した後4時間保持し、熱酸化によりSi基板11の表面に SiO_2 膜12を形成する(図2(b))。この SiO_2 膜12は、Si基板と LaAlO_3 薄膜13の格子不整を緩和する役割をする。

【0017】続いて、 SiO_2 膜12を形成したSi基板11を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MBE(Molecular Beam Epitaxy)装置内に導入する。

【0018】続いて基板温度を400~600度に昇温したところで LaAlO_3 の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々に直線的にYの組成を増加させ最終的には YAlO_3 となるように100nm程度にわたって LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13を形成する(図2(c))。

【0019】なお、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的には YAlO_3 となるように100nm程度にわたって LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13を形成してもよい。

【0020】なお、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度の LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜をLa/Y組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いて LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13を形成しても同様の効果が得られる。

【0021】 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。続いて、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜13を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、 LiNbO_3 ターゲットを使用して、基板温度400~600℃、真空度 2×10^{-2} Torr(1 Torr=133.322 Pa)、ガス分圧をAr: O₂=6: 4、RFパワー50W、磁場100Gで LiNbO_3 薄膜14を1μm程度形成する(図2(d))。

【0022】 LiNbO_3 薄膜14を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

10

20

30

40

50

【0023】 LaAlO_3 (格子定数 $2^{1/2}a = 5.37 \text{ \AA}$)
 $-\text{YAlO}_3$ (格子定数 $2^{1/2}a = 5.17 \text{ \AA}$) 系の格子定
 数と Si 基板 (格子定数 $a = 5.42 \text{ \AA}$) 及び LiNbO_3 (格子定
 数 $a = 5.148 \text{ \AA}$) との格子定数の関係を図13に示す。本発
 明の方法で Si 基板上に形成した LiNbO_3 薄膜は Si- LaAlO_3
 間の格子ミスマッチ量が 0.9%、 $\text{YAlO}_3-\text{LiNbO}_3$ 間の格子
 ミスマッチ量が 0.4%と従来の Si/ $\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$ の構成で
 形成した場合のミスマッチ量 5%と比較しても、かなり
 低減されていることがわかる。

【0024】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量 10
 を 1%以下に抑えることが可能となるため、高品質な LiNbO_3
 薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法より
 も厚い膜厚の LiNbO_3 薄膜の形成が可能になる。

【0025】 LiNbO_3 薄膜13の代わりに格子定数がほと
 んど変わらない LiTaO_3 を形成しても同様の効果が得られ
 る。

【0026】本発明によって Si 基板上に高品質な酸化物
 誘電体 that 作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学
 効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性
 波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子 20
 などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素
 子とを組み合わせた高性能な素子を提供することが可能
 となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能と
 なる。

【0027】(実施例2) 本発明における第2の実施の
 形態は、GaAs基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜に
 おいて、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減
 させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示して
 いる。

【0028】以下、本発明の第2の実施形態による半導 30
 体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説
 明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致
 していない。

【0029】図3は本実施形態にかかる半導体装置断面
 図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に
 図4(a)~(f)に示している。

【0030】まず、GaAsよりなる基板31の表面を洗浄
 する(図4(a))。基板の面方位は(001)方向とした。次にGa
 As基板31を真真空度が 10^{-7} Torr (1Torr=133.322Pa) 程度
 のECRプラズマCVD (Chemical Vapor Deposition) 装置に 40
 導入する。導入後、基板温度を 300°C 程度とし、温度が
 安定するまで10分間程度放置する。その後、マイクロ波
 出力200Wで、 O_2 ガスを $20\text{ cm}^3/\text{min}$ 及び SiH_4 ガスを $10\text{ cm}^3/\text{min}$
 で供給し、15~25A程度の SiO_2 薄膜を形成する(図4
 (b))。この SiO_2 膜32は、GaAs基板と $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄
 膜33の格子不整を緩和する役割をする。

【0031】続いて、 SiO_2 膜32を形成したGaAs基板3
 1を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MB
 E (Molecular Beam Epitaxy) 装置内に導入する。MBE装置
 のクヌードセンセル内には、金属ストロンチウム(S 50

r)、金属バリウム(Ba)、金属カルシウム(Ca)、チ
 タン(Ti)あるいはこれらの酸化物を充填しておく。

【0032】続いてGaAs基板温度を $400\sim 600^\circ\text{C}$ に昇温し
 たところで $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ の堆積を開始する。堆積時
 クヌードセンセルは、 350 から 1500°C の間の温度とし、Ga
 As基板と格子整合をとるために $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 堆積開
 始時の組成は $\text{Sr}/(\text{Ba}+\text{Sr}) = 0.1\sim 0.3$ の範囲とする。堆積
 を開始した後、クヌードセンセルの温度を変化させるこ
 とにより直線的にSrの組成を増加させ最終的には SrTiO_3
 O_3 となるように 100 nm 程度にわたって $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄
 膜33を形成する(図4(c))。

【0033】なお、 $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜33の形成方
 法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的に
 Baの組成を減少させ最終的には SrTiO_3 となるように 100 nm
 程度にわたって $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜33を形成しても
 よい。

【0034】なお、 $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜33の形成方
 法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD (Metal Orga
 nic Chemical Vapor Deposition) 装置を用いて、 $50\sim 10$
 0 nm 程度の $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜を Sr/Ba 組成比を一層ご
 とに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用い
 て $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜33を形成しても同様の効果が
 得られる。

【0035】 $\text{SrTiO}_3-\text{BaTiO}_3$ 薄膜33を形成する方法
 としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほか
 にMOMBE法 (Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、
 レーザアブレーション法 (Pulsed Laser Deposition :
 PLD法) を用いても同様の効果が得られる。

【0036】続いてGaAs基板温度を $400\sim 600^\circ\text{C}$ に保持
 し、 $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ の堆積を開始する。堆積を開始し
 した後、クヌードセンセルの温度を変化させることにより
 徐々にCaの組成を直線的に増加させ最終的には CaTiO_3 と
 なるように 100 nm 程度にわたって $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜3
 4を形成する(図4(d))。

【0037】なお、 $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜34の形成方
 法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的に
 Srの組成を減少させ最終的には CaTiO_3 となるように 100 nm
 程度にわたって $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜34を形成しても
 よい。

【0038】なお、 $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜34の形成方
 法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD (Metal Orga
 nic Chemical Vapor Deposition) 装置を用いて、 $50\sim 10$
 0 nm 程度の $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜を Ca/Sr 組成比を一層ご
 とに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用い
 て $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜34を形成しても同様の効果が
 得られる。

【0039】 $\text{SrTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ 薄膜34を形成する方法
 としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほか
 にレーザアブレーション法 (Pulsed Laser Deposition
 : PLD法) を用いても同様の効果が得られる。

【0040】続いてGaAs基板温度を400~600度に保持し、LaAlO₃の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々に直線的にYの組成を増加させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜35を形成する(図4(e))。

【0041】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜35の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜35を形成してもよい。

【0042】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜35の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のLaAlO₃-YAlO₃薄膜をLa/Y組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてLaAlO₃-YAlO₃薄膜33を形成しても同様の効果が得られる。

【0043】LaAlO₃-YAlO₃薄膜35を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0044】続いて、LaAlO₃-YAlO₃薄膜35を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、LiNbO₃ターゲットを使用して、基板温度400~600℃、真空度 2×10^{-2} Torr、ガス分圧Ar: O₂ = 6: 4、RFパワー50W、磁場100GでLiNbO₃薄膜36を1μm程度形成する(図4(f))。

【0045】LiNbO₃薄膜36を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

【0046】図13にLaAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.37 \text{ \AA}$) - YAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.17 \text{ \AA}$)の組成に対する格子定数とLiNbO₃(格子定数 $a = 5.148 \text{ \AA}$)との格子定数の関係を示し、図14にCaTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.36 \text{ \AA}$) - SrTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.52 \text{ \AA}$)系の組成に対する格子定数の関係を示す。図15にはBaTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.62 \text{ \AA}$) - SrTiO₃系の組成に対する格子定数の関係とGaAsの格子定数との関係を示している。本発明の方法でGaAs基板上に形成したLiNbO₃薄膜はGaAs-BaTiO₃-SrTiO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、CaTiO₃-LaAlO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、YAlO₃-LiNbO₃間の格子ミスマッチ量が0.4%と従来のGaAs/SiO₂/LiNbO₃の構成で形成した場合のミスマッチ量8.7%と比較しても、かなり低減されていることがわかる。

【0047】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、これまで困難であったGaAs基板上への高品質なLiNbO₃薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚のLiNbO₃薄膜の形成が可能になる。

【0048】LiNbO₃薄膜36の代わりに格子定数がほとんど変わらないLiTaO₃を形成しても同様の効果が得られる。

【0049】本発明によってGaAs基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子を組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【0050】(実施例3) 本発明における第3の実施の形態は、InP基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜において、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示している。

【0051】以下、本発明の第3の実施形態による半導体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致していない。

【0052】図5は本実施形態にかかる半導体装置断面図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に図6(a)~(g)に示している。

【0053】まず、InPよりなる基板51の表面を洗浄する(図6(a))。基板の面方位は(001)方向とした。次にInP基板51を真空度が 10^{-7} Torr程度のECRプラズマCVD(Chemical Vapor Deposition)装置に導入する。導入後、基板温度を300℃程度とし、温度が安定するまで10分間程度放置する。その後、マイクロ波出力200Wで、O₂ガスを20cm³/min及びSiH₄ガスを10cm³/minで供給し、15~25Å程度のSiO₂薄膜を形成する(図6(b))。このSiO₂膜52は、InP基板とBaTiO₃-BaHfO₃薄膜3の格子不整を緩和する役割をする。

【0054】続いて、SiO₂膜2を形成したInP基板51を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MBE(Molecular Beam Epitaxy)装置内に導入する。MBE装置のクヌードセンセル内には、金属ストロンチウム(Sr)、金属バリウム(Ba)、金属カルシウム(Ca)、チタン(Ti)、ハフニウム(Hf)あるいはこれらの酸化物を充填しておく。

【0055】続いてInP基板温度を400~500度に昇温したところでBaTiO₃-BaHfO₃の堆積を開始する。堆積開始時の組成はHf/(Hf+Ti)=0.7~0.9のBaTiO₃-BaHfO₃とする。堆積を開始した後、直線的にTiの組成を増加させ最終的にはBaTiO₃となるように100nm程度にわたってBaTiO₃-BaHfO₃薄膜53を形成する(図6(c))。

【0056】なお、BaTiO₃-BaHfO₃薄膜53の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にHfの組成を減少させ最終的にはBaTiO₃となるように100nm程度にわたってBaTiO₃-BaHfO₃薄膜53を100nm程度

形成してもよい。

【0057】なお、 BaTiO_3 - BaHfO_3 薄膜53の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度の BaTiO_3 - BaHfO_3 薄膜をTi/Hf組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いて BaTiO_3 - BaHfO_3 薄膜53を形成しても同様の効果が得られる。

【0058】 BaTiO_3 - BaHfO_3 薄膜53を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにMOMBE法(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0059】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、 SrTiO_3 - BaTiO_3 の堆積を開始する。堆積開始時の組成は BaTiO_3 とする。堆積を開始した後、クヌードセルの温度を変化させることにより直線的にSrの組成を増加させ最終的には SrTiO_3 となるように100nm程度にわたって SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜54を形成する(図6(d))。

【0060】なお、 SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜54の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にBaの組成を減少させ最終的には SrTiO_3 となるように100nm程度にわたって SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜54を形成してもよい。

【0061】なお、 SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜54の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度の SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜をSr/Ba組成比を一層ごとと階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いて SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜53を形成しても同様の効果が得られる。

【0062】 SrTiO_3 - BaTiO_3 薄膜54を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにMOMBE法(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0063】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、 SrTiO_3 - CaTiO_3 の堆積を開始する。堆積開始時の組成は SrTiO_3 とする。堆積を開始した後、クヌードセルの温度を変化させることにより徐々にCaの組成を増加させ最終的には CaTiO_3 となるように100nm程度にわたって SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55を形成する(図4(e))。

【0064】なお、 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にSrの組成を減少させ最終的には CaTiO_3 となるように100nm程度にわたって SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55を形成してもよい。

【0065】なお、 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100

0nm程度の SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜をCa/Sr組成比を一層ごとと階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いて SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55を形成しても同様の効果が得られる。

【0066】 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜55を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0067】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、 LaAlO_3 の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々にYの組成を増加させ最終的には YAlO_3 となるように100nm程度にわたって LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56を形成する(図6(f))。

【0068】なお、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的には YAlO_3 となるように100nm程度にわたって LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56を形成してもよい。

【0069】なお、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度の LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜をLa/Y組成比を一層ごとと階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いて LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56を形成しても同様の効果が得られる。

【0070】 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜56を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0071】続いて、 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜55を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、 LiNbO_3 ターゲットを使用して、基板温度400~600°C、真空度 2×10^{-2} Torr、ガス分圧Ar: O₂ = 6: 4、RFパワー50W、磁場100Gで LiNbO_3 薄膜7を1μm程度形成する(図6(g))。

【0072】 LiNbO_3 薄膜7を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

【0073】図13に LaAlO_3 - YAlO_3 系の組成に対する格子定数と LiNbO_3 との格子定数の関係を示し、図14に CaTiO_3 - SrTiO_3 系の組成に対する格子定数の関係を示す。図15は BaTiO_3 - SrTiO_3 系の組成に対する格子定数の関係を示した図であり、図16は BaTiO_3 - BaHfO_3 (格子定数 $2^{1/2}a = 5.92 \text{ \AA}$) 系の組成に対する格子定数の関係とInPの格子定数との関係を示した図である。本発明の方法でInP基板上に形成した LiNbO_3 薄膜はGaAs - BaHfO_3 - BaTiO_3 間の格子ミスマッチ量が約0%、 CaTiO_3 - LaAlO_3 間の格子ミスマッチ量が約0%、 YAlO_3 - LiNbO_3 間の格子ミスマッチ量が0.4%と従来のGaAs/SiO₂ / LiNbO_3 の構成で形成した場合のミスマッチ量8.7%と比較しても、かなり低減されていることがわかる。

【0074】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、これまで困難であったInP基板上への高品質なLiNbO₃薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚のLiNbO₃薄膜の形成が可能になる。

【0075】LiNbO₃薄膜57の代わりに格子定数がほとんど変わらないLiTaO₃を形成しても同様の効果が得られる。

【0076】本発明によってInP基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子を組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【0077】(実施例4)本発明における第4の実施の形態は、Si基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜において、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示している。

【0078】以下、本発明の第4の実施形態による半導体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致していない。

【0079】図7は本実施形態にかかる半導体装置断面図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に図8(a)～(c)に示している。

【0080】まず、Siよりなる基板71の表面を洗浄する(図8(a))。基板の面方位は(001)方向とした。

【0081】続いて、Si基板71を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MBE(Molecular Beam Epitaxy)装置内に導入する。

【0082】続いて基板温度を400～600度に昇温したところでLaAlO₃の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々に直線的にYの組成を増加させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜72を形成する(図8(b))。

【0083】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜72の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜72を形成してもよい。

【0084】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜72の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50～100nm程度のLaAlO₃-YAlO₃薄膜をLa/Y組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてLaAlO₃-YAlO₃薄膜72を形成しても同様の効果が得られる。

【0085】LaAlO₃-YAlO₃薄膜72を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。続いて、LaAlO₃-YAlO₃薄膜72を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、LiNbO₃ターゲットを使用して、基板温度400～600℃、真空度 2×10^{-2} Torr、ガス分圧をAr: O₂ = 6: 4、RFパワー50W、磁場100GでLiNbO₃薄膜3を1μm程度形成する(図8(d))。

【0086】LiNbO₃薄膜73を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

【0087】LaAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.37 \text{ \AA}$) - YAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.17 \text{ \AA}$)系の格子定数とSi基板(格子定数 $a = 5.42 \text{ \AA}$)及びLiNbO₃(格子定数 $a = 5.148 \text{ \AA}$)との格子定数の関係を図13に示す。本発明の方法でSi基板上に形成したLiNbO₃薄膜はSi-LaAlO₃間の格子ミスマッチ量が0.9%、YAlO₃-LiNbO₃間の格子ミスマッチ量が0.4%と従来のSi/SiO₂/LiNbO₃の構成で形成した場合のミスマッチ量5%と比較しても、かなり低減されていることがわかる。

【0088】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、高品質なLiNbO₃薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚のLiNbO₃薄膜の形成が可能になる。

【0089】LiNbO₃薄膜73の代わりに格子定数がほとんど変わらないLiTaO₃を形成しても同様の効果が得られる。

【0090】本発明によってSi基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子とを組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【0091】(実施例5)本発明における第5の実施の形態は、GaAs基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜において、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示している。

【0092】以下、本発明の第5の実施形態による半導体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致していない。

【0093】図9は本実施形態にかかる半導体装置断面図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に図10(a)～(d)に示している。

【0094】まず、GaAsよりなる基板91の表面を洗浄

する(図10(a))。基板の面方位は(001)方向とした。次にGaAs基板91を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MBE(Molecular Beam Epitaxy)装置内に導入する。MBE装置のクヌードセンセル内には、金属ストロンチウム(Sr)、金属バリウム(Ba)、金属カルシウム(Ca)、チタン(Ti)あるいはこれらの酸化物を充填しておく。

【0095】続いてGaAs基板温度を400~600度に昇温したところでSrTiO₃-BaTiO₃の堆積を開始する。堆積時クヌードセンセルは、350から1500℃の間の温度とし、GaAs基板と格子整合をとるためにSrTiO₃-BaTiO₃堆積開始時の組成はSr/(Ba+Sr)=0.1~0.3の範囲とする。堆積を開始した後、クヌードセンセルの温度を変化させることにより直線的にSrの組成を増加させ最終的にはSrTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-BaTiO₃薄膜92を形成する(図10(b))。

【0096】なお、SrTiO₃-BaTiO₃薄膜92の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にBaの組成を減少させ最終的にはSrTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-BaTiO₃薄膜92を形成してもよい。

【0097】なお、SrTiO₃-BaTiO₃薄膜92の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のSrTiO₃-BaTiO₃薄膜をSr/Ba組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてSrTiO₃-BaTiO₃薄膜92を形成しても同様の効果が得られる。

【0098】SrTiO₃-BaTiO₃薄膜92を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにMOVPE法(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0099】続いてGaAs基板温度を400~600度に保持し、SrTiO₃-CaTiO₃の堆積を開始する。堆積を開始した後、クヌードセンセルの温度を変化させることにより徐々にCaの組成を直線的に増加させ最終的にはCaTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-CaTiO₃薄膜93を形成する(図10(c))。

【0100】なお、SrTiO₃-CaTiO₃薄膜93の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にSrの組成を減少させ最終的にはCaTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-CaTiO₃薄膜93を形成してもよい。

【0101】なお、SrTiO₃-CaTiO₃薄膜93の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のSrTiO₃-CaTiO₃薄膜をCa/Sr組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてSrTiO₃-CaTiO₃薄膜93を形成しても同様の効果が

得られる。

【0102】SrTiO₃-CaTiO₃薄膜93を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0103】続いてGaAs基板温度を400~600度に保持し、LaAlO₃の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々に直線的にYの組成を増加させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜94を形成する(図10(d))。

【0104】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜94の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃薄膜94を形成してもよい。

【0105】なお、LaAlO₃-YAlO₃薄膜94の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のLaAlO₃-YAlO₃薄膜をLa/Y組成比を一層ごとに階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてLaAlO₃-YAlO₃薄膜94を形成しても同様の効果が得られる。

【0106】LaAlO₃-YAlO₃薄膜94を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0107】続いて、LaAlO₃-YAlO₃薄膜94を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、LiNbO₃ターゲットを使用して、基板温度400~600℃、真空度 2×10^{-2} Torr、ガス分圧Ar:O₂=6:4、RFパワー50W、磁場100GでLiNbO₃薄膜95を1μm程度形成する(図10(e))。

【0108】LiNbO₃薄膜95を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

【0109】図13にLaAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.37 \text{ \AA}$) - YAlO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.17 \text{ \AA}$)の組成に対する格子定数とLiNbO₃(格子定数 $a = 5.148 \text{ \AA}$)との格子定数の関係を示し、図14にCaTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.36 \text{ \AA}$) - SrTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.52 \text{ \AA}$)系の組成に対する格子定数の関係を示す。図15にはBaTiO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.62 \text{ \AA}$) - SrTiO₃系の組成に対する格子定数の関係とGaAsの格子定数との関係を示している。本発明の方法でGaAs基板上に形成したLiNbO₃薄膜はGaAs-BaTiO₃-SrTiO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、CaTiO₃-LaAlO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、YAlO₃-LiNbO₃間の格子ミスマッチ量が0.4%と従来のGaAs/SiO₂/LiNbO₃の構成で形成した場合のミスマッチ量8.7%と比較しても、かなり低減されていることがわかる。

【0110】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、これまで困難であったGaAs基板上への高品質なLiNbO₃薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚のLiNbO₃薄膜の形成が可能になる。

【0111】LiNbO₃薄膜95の代わりに格子定数がほとんど変わらないLiTaO₃を形成しても同様の効果が得られる。

【0112】本発明によってGaAs基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子を組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【0113】(実施例6)本発明における第6の実施の形態は、InP基板上に形成した酸化物誘電体結晶薄膜において、ミスフィット転位などの転位や結晶欠陥を低減させ高品質な酸化物誘電体結晶を形成する場合を示している。

【0114】以下、本発明の第6の実施形態による半導体装置の製造方法の詳細について図面を参照しながら説明する。なお、図面の寸法は実際の場合と必ずしも一致していない。

【0115】図11は本実施形態にかかる半導体装置断面図を示している。この半導体装置の製造方法は工程順に図12(a)~(f)に示している。

【0116】まず、InPよりなる基板111の表面を洗浄する(図6(a))。基板の面方位は(001)方向とした。次にInP基板111を酸素ラジカル併用電子ビーム方式の酸化物形成用MBE(Molecular Beam Epitaxy)装置内に導入する。MBE装置のクヌードセンサー内には、金属ストロンチウム(Sr)、金属バリウム(Ba)、金属カルシウム(Ca)、チタン(Ti)、ハフニウム(Hf)あるいはこれらの酸化物を充填しておく。

【0117】続いてInP基板温度を400~500度に昇温したところでBaTiO₃-BaHfO₃の堆積を開始する。堆積開始時の組成はHf/(Hf+Ti)=0.7~0.9のBaTiO₃-BaHfO₃とする。堆積を開始した後、直線的にTiの組成を増加させ最終的にはBaTiO₃となるように100nm程度にわたってBaTiO₃-BaHfO₃薄膜112を形成する(図12(b))。

【0118】なお、BaTiO₃-BaHfO₃薄膜112の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にHfの組成を減少させ最終的にはBaTiO₃となるように100nm程度にわたってBaTiO₃-BaHfO₃薄膜112を100nm程度形成してもよい。

【0119】なお、BaTiO₃-BaHfO₃薄膜112の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~

100nm程度のBaTiO₃-BaHfO₃薄膜をTi/Hf組成比を一層ごと段階状に変化させながら多層に形成する方法を用いてBaTiO₃-BaHfO₃薄膜112を形成しても同様の効果が得られる。

【0120】BaTiO₃-BaHfO₃薄膜112を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにMOMBE法(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0121】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、SrTiO₃-BaTiO₃の堆積を開始する。堆積開始時の組成はBaTiO₃とする。堆積を開始した後、クヌードセンサーの温度を変化させることにより直線的にSrの組成を増加させ最終的にはSrTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-BaTiO₃薄膜113を形成する(図12(c))。

【0122】なお、SrTiO₃-BaTiO₃薄膜113の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にBaの組成を減少させ最終的にはSrTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-BaTiO₃薄膜113を形成してもよい。

【0123】なお、SrTiO₃-BaTiO₃薄膜113の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のSrTiO₃-BaTiO₃薄膜をSr/Ba組成比を一層ごと段階状に変化させながら多層に形成する方法を用いてSrTiO₃-BaTiO₃薄膜113を形成しても同様の効果が得られる。

【0124】SrTiO₃-BaTiO₃薄膜113を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにMOMBE法(Metal Organic Molecular Beam Epitaxy)、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0125】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、SrTiO₃-CaTiO₃の堆積を開始する。堆積開始時の組成はSrTiO₃とする。堆積を開始した後、クヌードセンサーの温度を変化させることにより徐々にCaの組成を増加させ最終的にはCaTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-CaTiO₃薄膜114を形成する(図12(d))。

【0126】なお、SrTiO₃-CaTiO₃薄膜114の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にSrの組成を減少させ最終的にはCaTiO₃となるように100nm程度にわたってSrTiO₃-CaTiO₃薄膜114を形成してもよい。

【0127】なお、SrTiO₃-CaTiO₃薄膜114の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のSrTiO₃-CaTiO₃薄膜をCa/Sr組成比を一層ごと段階状に変化させながら多層に形成する方法を用いてSrTiO₃-CaTiO₃薄膜114を形成しても同様の効果

が得られる。

【0128】SrTiO₃-CaTiO₃ 薄膜114を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0129】続いてInP基板温度を400~500度に保持し、LaAlO₃の堆積を開始する。堆積を開始した後、徐々にYの組成を増加させ最終的にはYAlO₃となるようにを100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃ 薄膜116を形成する(図12(e))。

【0130】なお、LaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115の形成方法としては、堆積を開始した後、徐々に逆指数関数的にLaの組成を減少させ最終的にはYAlO₃となるように100nm程度にわたってLaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115を形成してもよい。

【0131】なお、LaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115の形成方法としては、RFスパッタリング装置やMOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)装置を用いて、50~100nm程度のLaAlO₃-YAlO₃ 薄膜をLa/Y組成比を一層ごと階段状に変化させながら多層に形成する方法を用いてLaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115を形成しても同様の効果が得られる。

【0132】LaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115を形成する方法としては、MBE法、RFスパッタリング法、MOCVD法のほかにレーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)を用いても同様の効果が得られる。

【0133】続いて、LaAlO₃-YAlO₃ 薄膜115を形成した基板をRFスパッタリング装置に導入し、LiNbO₃ターゲットを使用して、基板温度400~600℃、真空度 2×10^{-2} Torr、ガス分圧Ar: O₂ = 6: 4、RFパワー50W、磁場100GでLiNbO₃ 薄膜116を1μm程度形成する(図12(f))。

【0134】LiNbO₃ 薄膜116を形成する方法としては、RFスパッタリング法のほかにMBE法、レーザアブレーション法(Pulsed Laser Deposition: PLD法)、MOCVD法を用いても同様の効果が得られる。

【0135】図13にLaAlO₃-YAlO₃系の組成に対する格子定数とLiNbO₃との格子定数の関係を示し、図14にCaTiO₃-SrTiO₃系の組成に対する格子定数の関係を示す。図15はBaTiO₃-SrTiO₃系の組成に対する格子定数の関係を示した図であり、図16はBaTiO₃-BaHfO₃(格子定数 $2^{1/2}a = 5.92 \text{ \AA}$)系の組成に対する格子定数の関係とInPの格子定数との関係を示した図である。本発明の方法でInP基板上に形成したLiNbO₃ 薄膜はGaAs-BaHfO₃-BaTiO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、CaTiO₃-LaAlO₃間の格子ミスマッチ量が約0%、YAlO₃-LiNbO₃間の格子ミスマッチ量が0.4%と従来のGaAs/SiO₂/LiNbO₃の構成で形成した場合のミスマッチ量8.7%と比較しても、かなり低減されていることがわかる。

【0136】本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、これまで困

難であったInP基板上への高品質なLiNbO₃ 薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚のLiNbO₃ 薄膜の形成が可能になる。

【0137】LiNbO₃ 薄膜117の代わりに格子定数がほとんど変わらないLiTaO₃を形成しても同様の効果が得られる。

【0138】本発明によってInP基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子を組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【0139】実施例1~6では擬イルメナイト系のLiNbO₃やLiTaO₃ 薄膜を形成する場合についての例であったが、下地層の構成を変化させることでペロブスカイト系のKNbO₃(格子定数 $a=5.68$, $b=3.9692$, $c=5.72$)、KTaO₃(格子定数 $\sqrt{2}a=5.64$)を形成する場合でも同様の効果が得られる。

【0140】KNbO₃ではBaTiO₃-BaHfO₃系酸化物薄膜上に形成することにより格子ミスマッチ量が低減可能となり(図16)、KTaO₃ではBaTiO₃-SrTiO₃系酸化物薄膜上に形成することにより格子ミスマッチ量が低減可能となる(図15)。

【0141】

【発明の効果】本発明による半導体装置は、最終的に形成する酸化物誘電体結晶の格子定数に近づくように組成を変化させた酸化物薄膜を多層に形成し、この酸化物薄膜の格子定数を半導体基板の格子定数から酸化物誘電体結晶の格子定数まで徐々に変化させることで、従来問題となっていたミスフィット転位を低減させることによって、半導体基板上であっても高品質な酸化物誘電体結晶を得ることが可能となる。

【0142】特に本発明において中間層として用いているペロブスカイト系結晶は近年、半導体基板上に絶縁膜として高品質の結晶が形成可能になってきており、この中間層として用いているペロブスカイト系結晶上に異種のペロブスカイト系結晶、あるいはペロブスカイト系結晶と結晶構造が類似している擬イルメナイト系結晶を形成することで、より高品質な酸化物誘電体結晶を形成することが可能としている。

【0143】また、本発明の方法によれば、格子ミスマッチ量を1%以下に抑えることが可能となるため、Siは言うまでもなく、これまで困難であったInP基板上への高品質な酸化物誘電体薄膜の形成が可能になるとともに、従来の方法よりも厚い膜厚の酸化物誘電体薄膜の形成が可能になる。

【0144】本発明によって半導体基板上に高品質な酸化物誘電体が作製可能となるため、酸化物誘電体の電気

光学効果を利用した光変調器、圧電効果を利用した表面弾性波素子あるいは非線形光学効果を利用した波長変換素子などとトランジスタや半導体レーザなどの半導体電子素子を組み合わせた高性能な素子を提供することが可能となる。併せてこれらの素子を集積化することも可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る第1の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図

【図2】本発明に係る第1の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図 10

【図3】本発明に係る第2の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図

【図4】本発明に係る第2の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図

【図5】本発明に係る第3の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図

【図6】本発明に係る第3の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図

【図7】本発明に係る第1の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図 20

【図8】本発明に係る第1の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図

【図9】本発明に係る第2の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図

【図10】本発明に係る第2の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図

【図11】本発明に係る第3の実施の形態を示す半導体装置の構造断面図

【図12】本発明に係る第3の実施の形態を示す半導体装置の製造方法を工程順に示した構造断面図 30

【図13】 LaAlO_3 - YAlO_3 系酸化物結晶における組成に対する格子定数(a 軸)のグラフ

【図14】 SrTiO_3 - CaTiO_3 系酸化物結晶における組成に対する格子定数(a 軸)のグラフ

【図15】 BaTiO_3 - SrTiO_3 系酸化物結晶における組成に対する格子定数(a 軸)のグラフ

【図16】 BaHfO_3 - BaTiO_3 系酸化物結晶における組成に対する格子定数(a 軸)のグラフ

【図17】半導体基板上に形成した酸化物誘電体を利用した素子の一例を示す図

【符号の説明】

11 Si基板

12 SiO_2 パッド層

13 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

14 LiNbO_3 薄膜

31 GaAs基板

32 SiO_2 パッド層

33 BaTiO_3 - SrTiO_3 薄膜

34 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜

35 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

36 LiNbO_3 薄膜

51 InP基板

52 SiO_2 パッド層

53 BaHfO_3 - BaTiO_3 薄膜

54 BaTiO_3 - SrTiO_3 薄膜

55 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜

56 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

57 LiNbO_3 薄膜

71 Si基板

72 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

73 LiNbO_3 薄膜

91 GaAs基板

92 BaTiO_3 - SrTiO_3 薄膜

93 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜

94 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

95 LiNbO_3 薄膜

111 InP基板

112 BaHfO_3 - BaTiO_3 薄膜

113 BaTiO_3 - SrTiO_3 薄膜

114 SrTiO_3 - CaTiO_3 薄膜

115 LaAlO_3 - YAlO_3 薄膜

116 LiNbO_3 薄膜

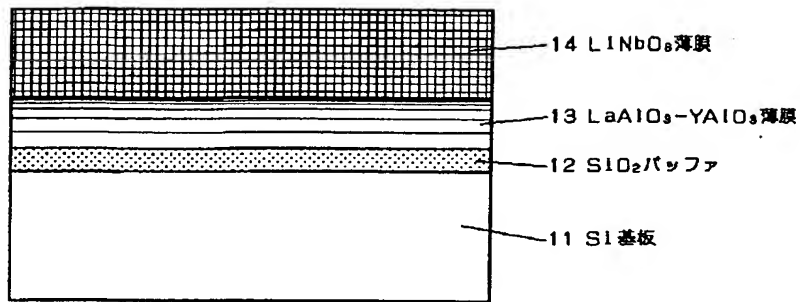
171 InP基板

172 酸化物強誘電体光変調器

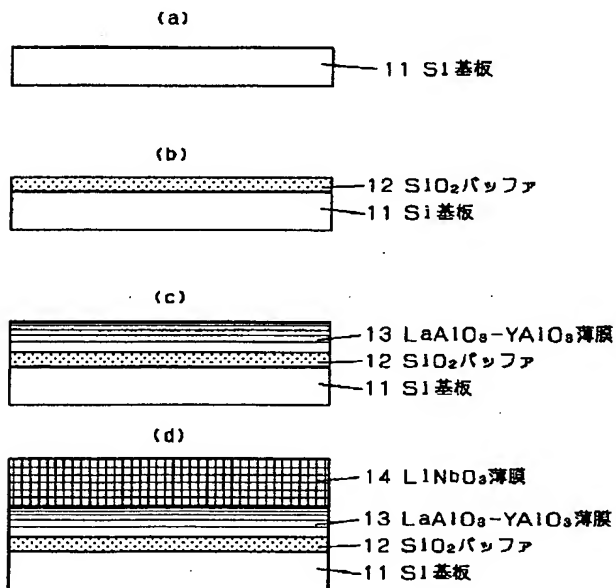
173 通信波長帯レーザダイオード

174 駆動回路部(InP HEMT)

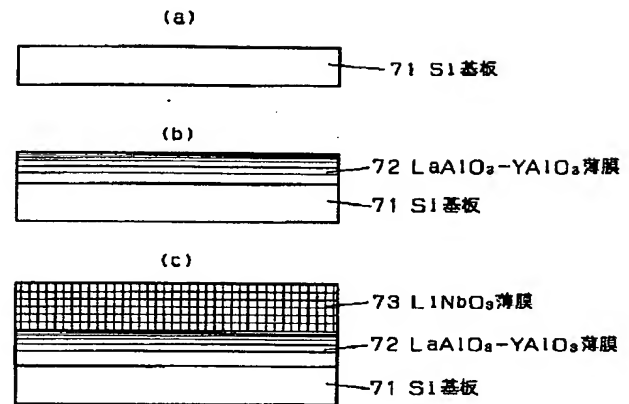
【 図1 】



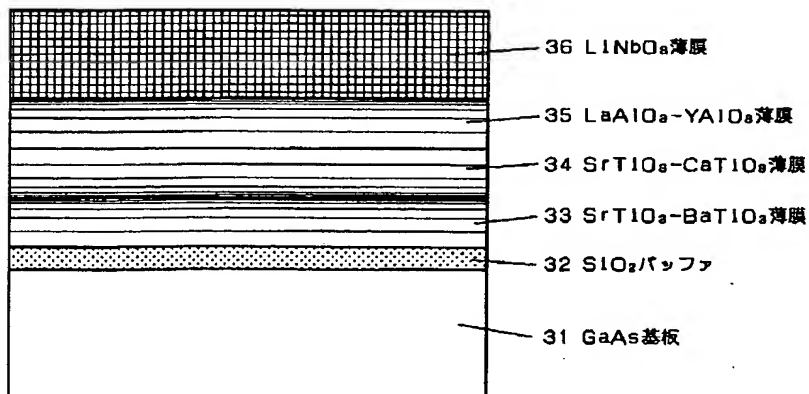
【 図2 】



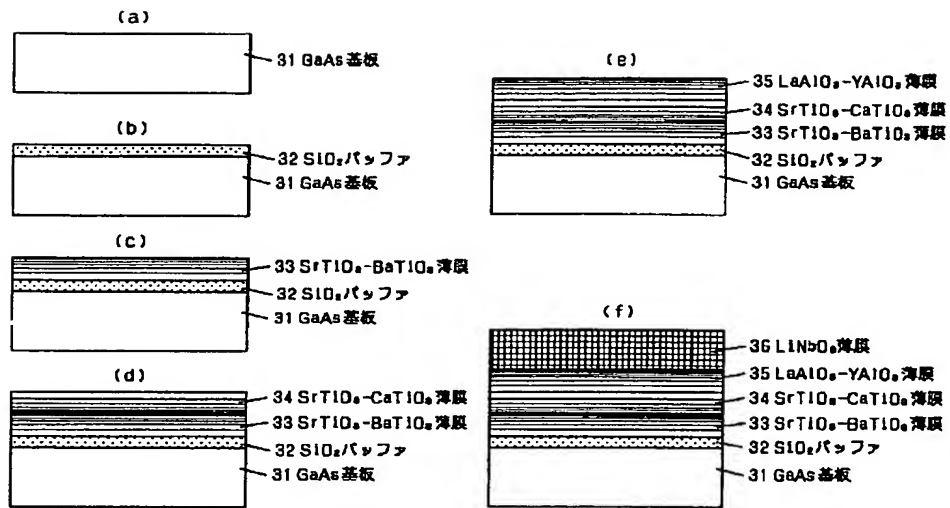
【 図8 】



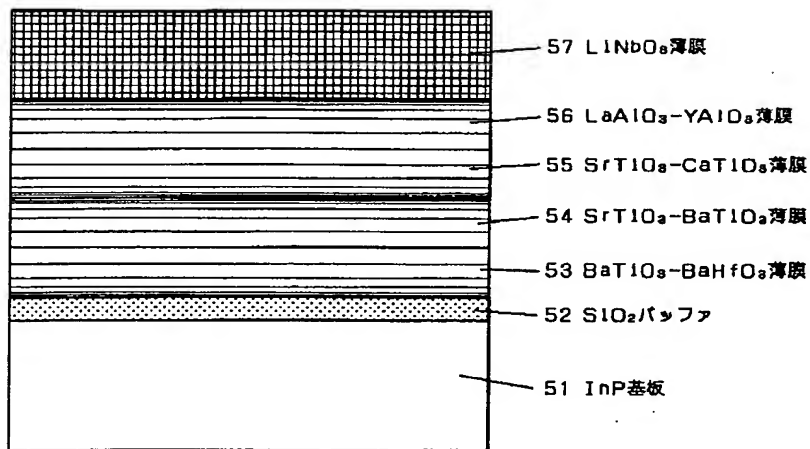
【 図3 】



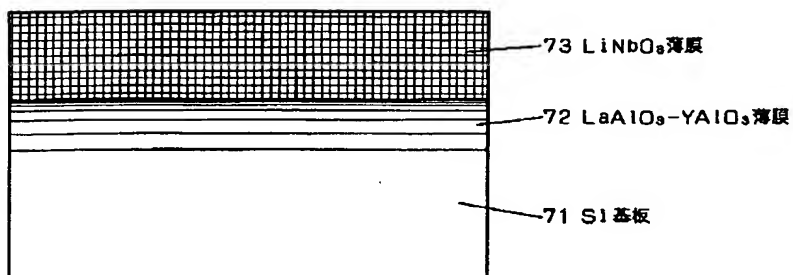
【 図4 】



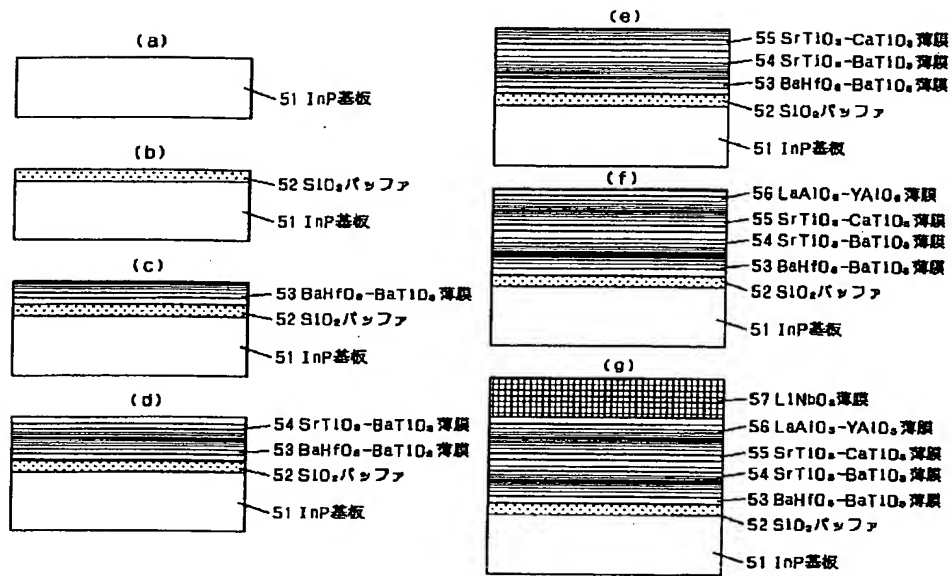
【 図5 】



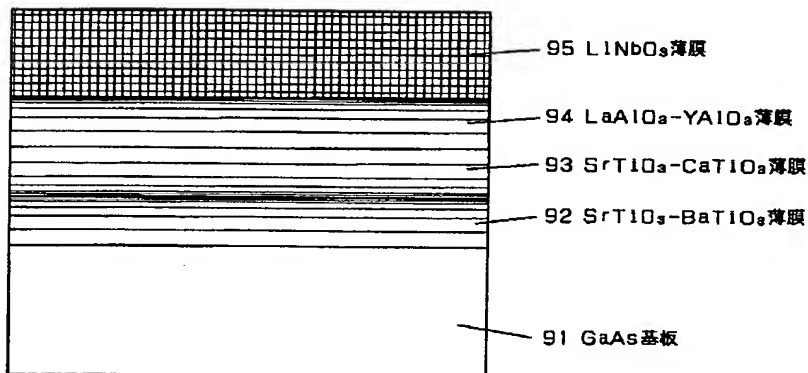
【 図7 】



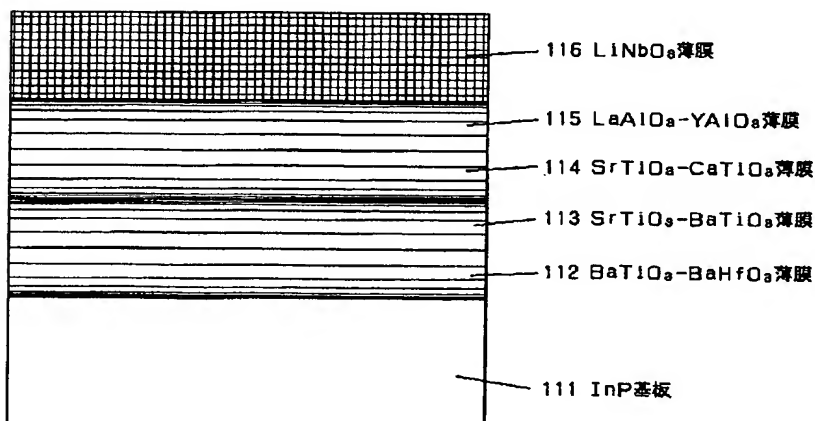
【 図6 】



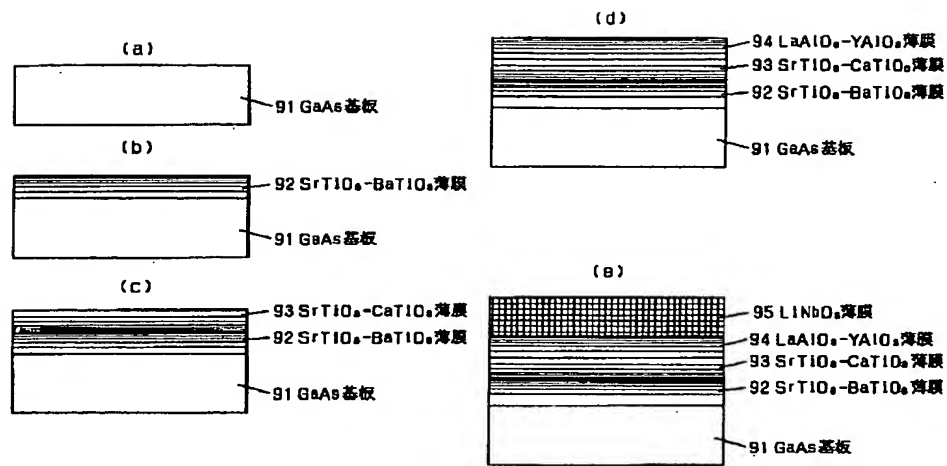
【 図9 】



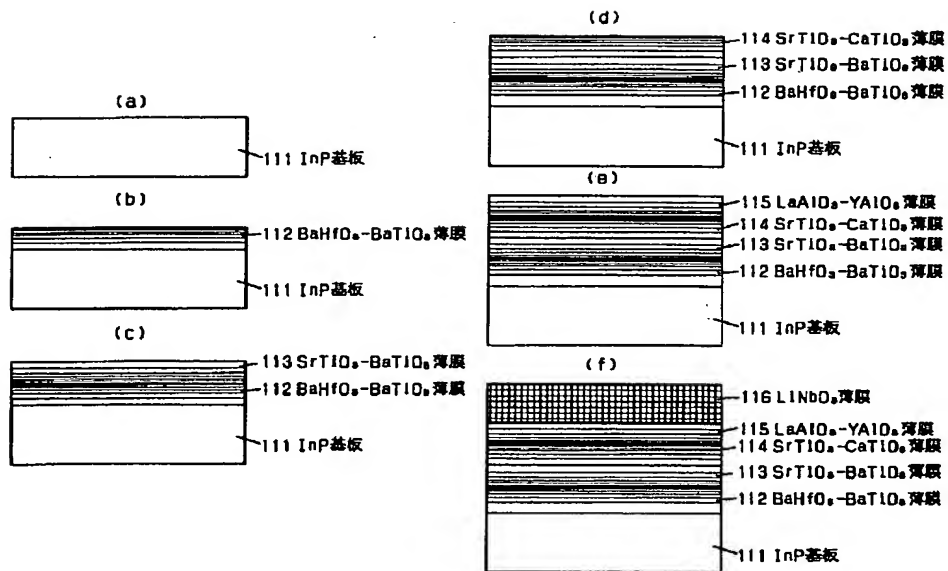
【 図11 】



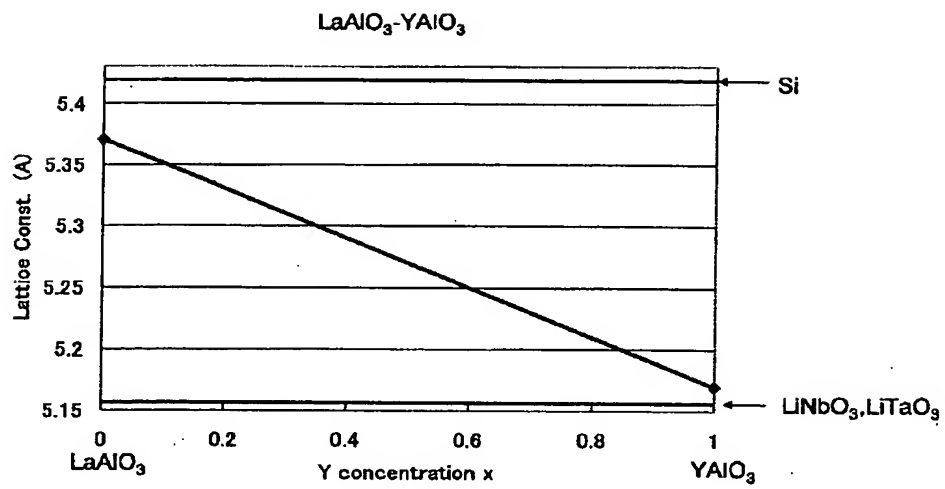
【 図10 】



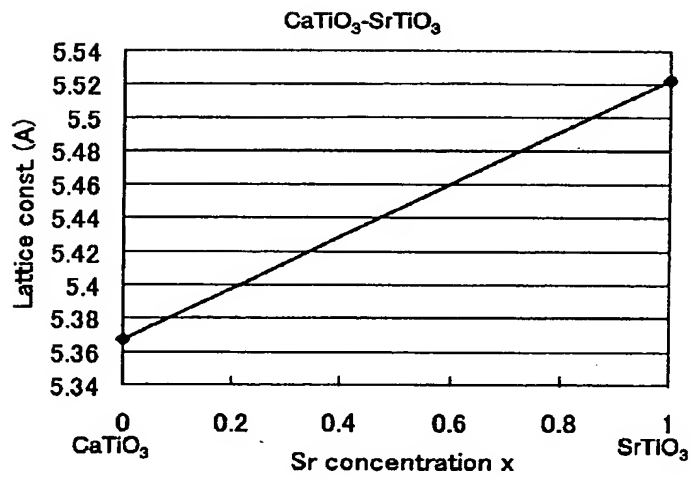
【 図12 】



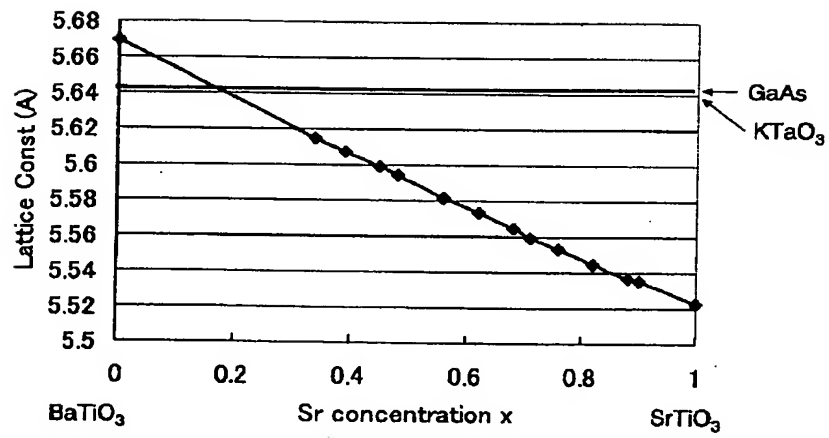
【 図13 】



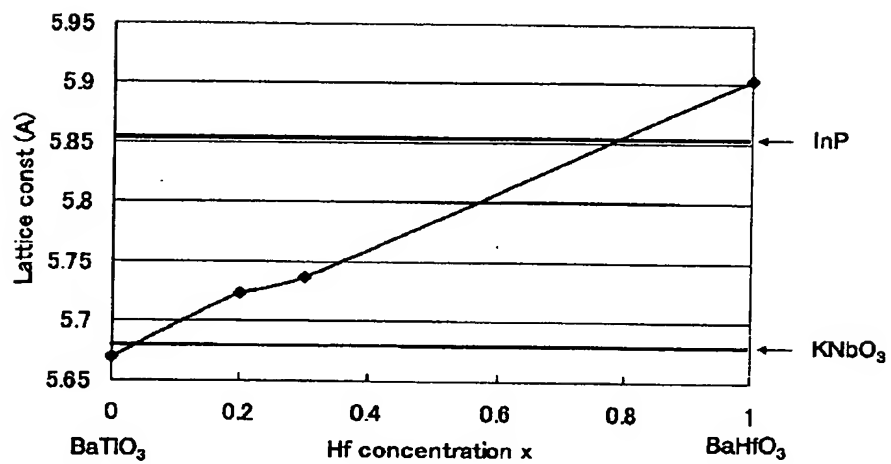
【 図14 】



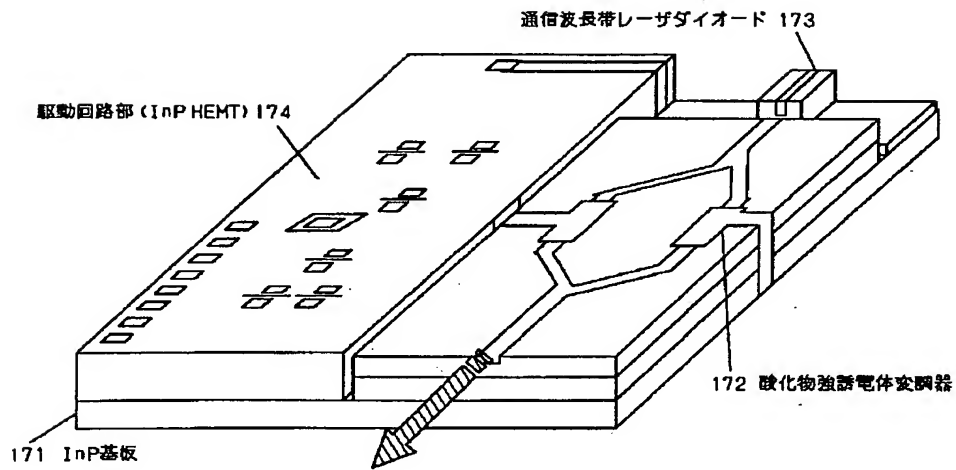
【 図15 】

 $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$ 

【 図16 】

 $\text{BaTiO}_3\text{-BaHfO}_3$ 

【 図17 】



フロント ページの続き

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	FI	ターム (参考)
G 0 2 F	1/335	G 0 2 F	1/377
	1/355	G 0 2 B	6/12
	1/377		M
			H

F ターム (参考) 2H047 KA02 PA04 PA05 QA02 RA08
 2H079 AA02 AA12 CA05 DA03 DA22
 2K002 CA02 CA03 CA22 FA02 FA04
 FA05 FA07
 5F058 BA20 EB01 EB02 ED02 ED04
 ED05 BF06 BF12 BF20